

# 基于 GIS 的福建省水土保持功能重要性评价

雷 泳 南

(福建省水利水电勘测设计研究院, 福建福州 350001)

**摘 要:** [目的] 对福建省水土保持功能重要性进行评价, 为该省生态保护红线划定提供科学参考。[方法] 基于 GIS 技术, 利用降水、土壤、数字高程和植被指数等数据, 采用修正通用水土流失方程(RUSLE), 估算福建省土壤保持量, 并对其分级。[结果] 全省土壤保持总量为  $2.65 \times 10^9$  t/a, 平均土壤保持模数为 20 789.82 t/(km<sup>2</sup>·a)。水土保持功能极其重要区、高度重要区、中等重要区、较为重要区和一般重要区面积分别为 3 192.54, 8 205.54, 15 547.71, 21 519.81, 74 000.20 km<sup>2</sup>, 分别占全省面积的 2.61%, 6.70%, 12.70%, 17.57% 和 60.42%。[结论] 福建省水土保持功能极其重要区、高度重要区和中等重要区主要分布在闽西和闽中 2 大山带及其周边丘陵山地区。

**关键词:** 水土保持功能; GIS; 重要性评价; 福建省

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2020)05-0262-06

中图分类号: S157

**文献参数:** 雷泳南. 基于 GIS 的福建省水土保持功能重要性评价[J]. 水土保持通报, 2020, 40(5): 262-267. DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2020.05.038; Lei Yongnan. Importance evaluation of soil and water conservation function in Fujian Province based on GIS [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2020, 40(5): 262-267.

## Importance Evaluation of Soil and Water Conservation Function in Fujian Province Based on GIS

Lei Yongnan

(Fujian Research Institute of Investigation and Design of Water Resources and Hydropower, Fuzhou, Fujian 350001, China)

**Abstract:** [Objective] The importance of soil and water conservation was evaluated as a means to provided a scientific basis for ecological protection via red line delimitation in Fujian Province. [Methods] The soil conservation modulus in Fujian Province was estimated and classified using GIS technology and the revised universal soil loss equation (RUSLE) along with data such as precipitation, soil, digital elevation, and vegetation index. [Results] The total amount of soil conservation in Fujian Province was estimated to be  $2.65 \times 10^9$  t/a, and the average soil conservation modulus was 20 789.82 t/(km<sup>2</sup>·a). The soil and water conservation functional areas in Fujian Province were classified into five types: extremely important, highly important, medium importance, relatively important, and generally important. These corresponded to areas of 3 192.54, 8 205.54, 15 547.71, 21 519.81, and 74 000.20 km<sup>2</sup>, respectively, which represent 2.61%, 6.70%, 12.70%, 17.57%, and 60.42% of the total area of the province, respectively. [Conclusion] The extremely important areas, highly important areas, and areas of medium importance with respect to the need for soil and water conservation are mainly distributed in two mountain zones of the Western and Central Fujian Province and the surrounding hilly areas.

**Keywords:** soil and water conservation function; GIS; importance evaluation; Fujian Province

水土保持功能是指在水土保持过程中所采取的各项措施对保护和改良人类及其社会赖以生存和发展的自然环境条件的综合效用<sup>[1]</sup>。水土保持功能重要性评价是根据区域生态环境特征, 分析水土保持功

能分异规律, 划分不同重要性等级水土保持功能区<sup>[2]</sup>。水土保持功能重要性评价的结果可为管理区域生态系统、确定生态保护红线、制订生态保护政策等提供依据<sup>[2]</sup>。

福建省作为典型的南方红壤丘陵区,地形崎岖坡度大,降雨丰富而时空分布不均,易发生水土流失<sup>[3]</sup>。近年来,随着建设生态省和生态文明先行示范区等重大决策相继实施,水土保持生态建设取得了高速发展<sup>[4]</sup>。根据曾舒娇等<sup>[5]</sup>利用GIS和RS技术分析表明,1990—2015年福建省水土流失面积总体呈现减少趋势;王春菊等<sup>[6]</sup>利用GIS技术分析表明,福建省土壤侵蚀敏感性强度总体呈现内陆丘陵山地向沿海低丘递减趋势;陈思旭等<sup>[7]</sup>利用RUSLE模型分析表明,福建省土壤侵蚀空间分布呈现点状特征,局部侵蚀强烈。总体上,福建省关于土壤侵蚀研究以土壤侵蚀现状监测和评估的分析居多,对作为评价生态系统水土保持功能的土壤保持量研究鲜有报道。目前,在生态文明建设的大背景下,生态保护红线是福建省和周边区域生态安全的底线,而水土保持功能区作为生态保护红线的重要组成部分,开展福建省水土保持功能重要性评估是十分必要的。据此,本文基于GIS技术,利用降水、土壤、数字高程和植被指数等数据,采用修正通用水土流失方程(RUSLE),估算福建省土壤保持量,进而划分不同等级的水土保持功能区,旨在为福建省生态保护红线划定提供科学参考。

## 1 材料与方法

### 1.1 材料

1.1.1 研究区概况 福建省位于中国东南沿海,地处115°50′—120°44′E,23°31′—28°19′N。陆地东西最长约480 km,南北最长约530 km,土地总面积约1.23×10<sup>5</sup> km<sup>2</sup>。闽西大山带和闽中大山带构成境内地形的骨架,地势西北高东南低,丘陵和山地约占全省土地总面积的80%以上。气候属南亚热带气候和中亚热带气候,常年温和湿润,年平均气温17~21℃,年平均降雨量1 100~2 000 mm。植被属南亚热带季雨林和中亚热带常绿阔叶林。土壤类型主要为红壤、黄壤和赤红壤,土壤侵蚀类型以水力侵蚀为主。

1.1.2 数据 降雨基础数据来自中国气象数据共享网,在网上获取研究区及周边降水月值数据(2014—2018年)。土壤基础数据来自第二次全国土地调查的1:100万土壤数据,获取于中科院西部环境与生态科学数据中心。空间分辨率为1 km数字高程数据和植被基础数据分别来自中国海拔高度(DEM)空间分布数据和中国年度植被指数(NDVI)空间分布数据集(2014—2018年),获取于中科院资源环境科学与数据中心。

### 1.2 方法

根据《生态保护红线划定指南》<sup>[8]</sup>推荐,本文采用

修正通用水土流失方程(RUSLE)的水土保持服务模型开展评价,具体流程见图1。模型结构如下:

$$A_p = R \times K \times L \times S \quad (1)$$

$$A_r = R \times K \times L \times S \times C \times P \quad (2)$$

$$A_c = A_p - A_r = R \times K \times L \times S \times (1 - C \times P) \quad (3)$$

式中: $A_c$ 为土壤保持量[t/(hm<sup>2</sup>·a)]; $A_p$ 为潜在土壤侵蚀量[t/(hm<sup>2</sup>·a)]; $A_r$ 为实际土壤侵蚀量[t/(hm<sup>2</sup>·a)]; $R$ 为降雨侵蚀因子[(MJ·mm)/(hm<sup>2</sup>·h·a)]; $K$ 为土壤可蚀性因子[(t·hm<sup>2</sup>·h)/(MJ·hm<sup>2</sup>·mm)]; $L, S$ 为地形因子(无量纲); $C$ 为植被覆盖因子(无量纲); $P$ 为水土保持措施因子(无量纲)。本次评价仅考虑自然生态系统, $P$ 赋值为1。

本文采用自然断点法<sup>[9-10]</sup>将评价等级分为5级:一般重要、较为重要、中等重要、高度重要和极其重要。

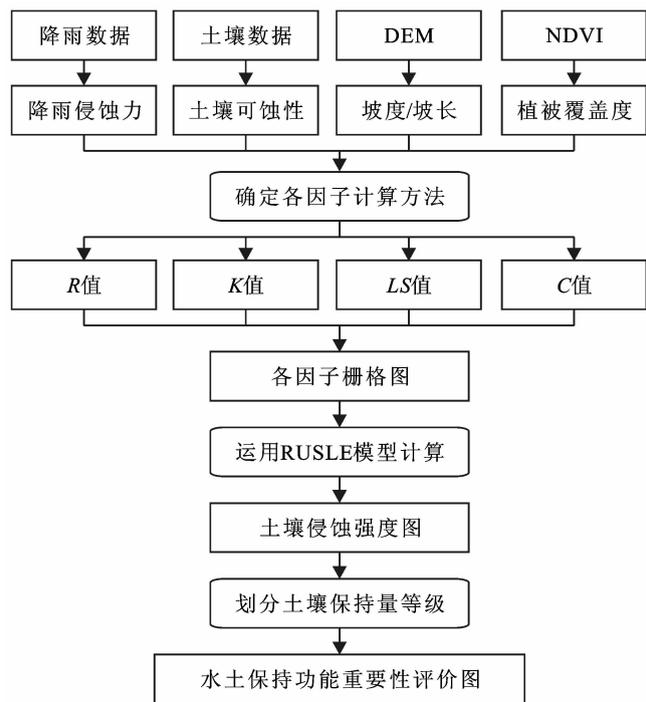


图1 水土保持功能重要性评价流程

1.2.1 降雨侵蚀因子 降雨侵蚀力是指由降雨引起土壤侵蚀的潜在能力,其难以直接测定,一般采用降雨量、降雨强度、降雨历时等降雨参数估算<sup>[11-12]</sup>。本文降雨侵蚀因子 $R$ 采用周伏建等<sup>[13]</sup>提出的福建省降雨侵蚀力估算方法,公式如下:

$$R = \sum_{i=1}^{12} (-2.6398 + 0.3046P_i) \quad (4)$$

式中: $P_i$ 为月均降雨量(mm),

根据降雨基础数据,计算得到2014—2018年研究区及周边台站5 a间各月降雨均值,利用公式(4)计算得到各台站年均降雨侵蚀力 $R$ 值。通过ArcGIS对 $R$ 值进行普通克里金插值,获得研究区降雨侵蚀

力空间分布特征(见图 2a)。

1.2.2 土壤可蚀性因子 土壤可蚀性因子是土壤侵蚀敏感性的度量,反映了不同类型土壤抵抗侵蚀能力

$$K = f_{csand} \times f_{d-si} \times f_{orgc} \times f_{hisand} \quad (5)$$

$$\begin{cases} f_{csand} = 0.2 + 0.3 \exp[-0.025 \text{ ms}(1 - \text{msilt}/100)] \\ f_{d-si} = [\text{msilt}/(\text{mc} + \text{msilt})]^{0.3} \\ f_{orgc} = 1 - 0.25 \text{ orgC}/[\text{orgC} + \exp(3.72 - 2.95 \text{ orgC})] \\ f_{hisand} = 1 - 0.7(1 - \text{ms}/100)/\{(1 - \text{ms}/100) + \exp[-5.51 + 22.9(1 - \text{ms}/100)]\} \end{cases} \quad (6)$$

式中:ms 为土壤粗砂含量(%);msilt 为土壤粉砂含量(%);mc 为土壤黏粒含量(%);orgC 为有机碳含量(%)。

根据土壤基础数据,通过 ArcGIS 分别提取土壤粗砂、粉砂、黏粒和有机碳含量,按照公式(5)–(6)计算土壤侵蚀力  $K$  值,获得研究区土壤侵蚀力空间分布特征(见图 2b)。

1.2.3 地形因子 地形因子包括坡长因子和坡度因子,前者是指在降雨、土壤、坡度和地表状况等条件相同的情况下,某坡长的坡面土壤流失量与标准坡长的坡面土壤流失量之比;后者是指在其他条件相同的情况下,某坡度的坡面土壤流失量与标准坡度的坡面土壤流失量之比<sup>[11]</sup>。本文坡长因子  $L$  和坡度因子  $S$  采用刘宝元等<sup>[14]</sup>提出的方法,公式如下:

$$L = (\lambda/22.13)^m \quad (7)$$

$$\begin{cases} m = 0.2 & (\theta < 1^\circ) \\ m = 0.3 & (1^\circ \leq \theta < 3^\circ) \\ m = 0.4 & (3^\circ \leq \theta < 5^\circ) \\ m = 0.5 & (\theta \geq 5^\circ) \end{cases} \quad (8)$$

的高低<sup>[11]</sup>。本文土壤可蚀性因子  $K$  采用《生态保护红线划定指南》<sup>[8]</sup>推荐方法,公式如下:

$$K = f_{csand} \times f_{d-si} \times f_{orgc} \times f_{hisand} \quad (5)$$

$$\begin{cases} S = 10.8 \sin \theta + 0.03 & (\theta < 5^\circ) \\ S = 16.8 \sin \theta - 0.50 & (5^\circ \leq \theta < 10^\circ) \\ S = 21.91 \sin \theta - 0.96 & (\theta \geq 10^\circ) \end{cases} \quad (9)$$

式中: $\lambda$  为坡长(m); $m$  为坡长指数; $\theta$  为坡度( $^\circ$ )。

根据数字高程数据,利用 ArcGIS 掩膜提取研究区 DEM,按照公式(7)–(9)计算坡度坡长因子  $LS$  值,获得研究区地形因子空间分布特征(见图 3,附图 15)。

1.2.4 植被覆盖因子 植被覆盖因子是指在相同的降雨、土壤和地形条件下,一定时间内长有植被或作物的土地与撂荒土地的土壤流失量之比<sup>[15]</sup>。本文植被覆盖度采用归一化植被指数(NDVI)来估算,植被覆盖因子  $C$  采用蔡崇法等<sup>[12]</sup>提出的方法,公式如下:

$$\begin{cases} C = 1 & (c = 0) \\ C = 0.6508 - 0.3436 \lg c & (0 < c \leq 78.3\%) \\ C = 0 & (c > 78.3\%) \end{cases} \quad (10)$$

式中: $c$  为植被覆盖度。

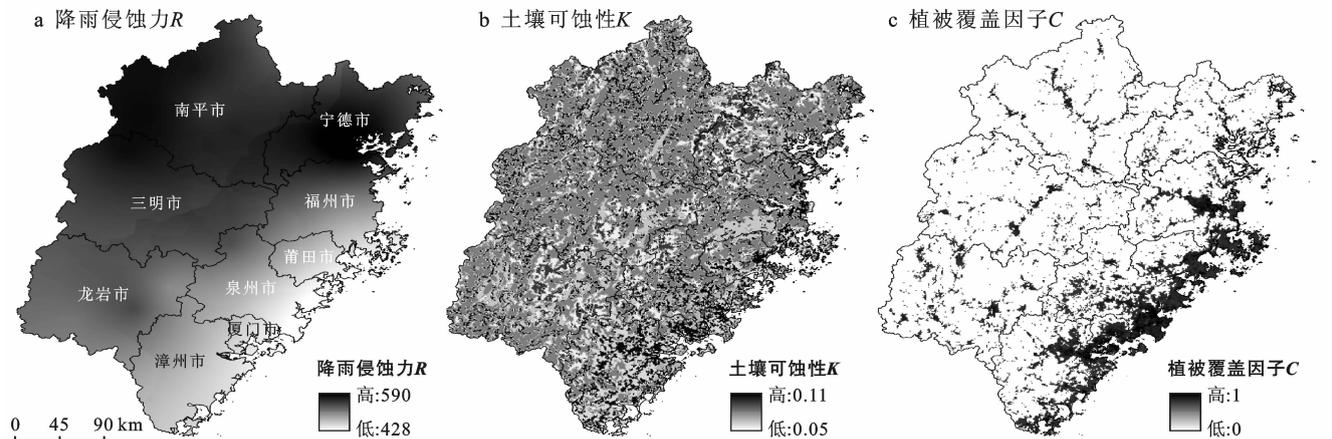


图 2 福建省 RUSLE 各因子空间分布

利用中国年度植被指数(NDVI)空间分布数据集(2014—2018年)计算年平均 NDVI 值,按照公式(10)计算植被覆盖因子  $C$  值,获得研究区植被覆盖因子空间分布特征(见图 2c)。

## 2 结果与分析

### 2.1 实际土壤侵蚀量

全省实际土壤侵蚀总量为  $1.33 \times 10^8$  t/a,平均土

壤侵蚀模数为  $1\,526.93$  t/( $\text{km}^2 \cdot \text{a}$ ) (见表 1)。从实际土壤侵蚀量上看,泉州市( $2.76 \times 10^7$  t/a) > 福州市( $2.73 \times 10^7$  t/a) > 漳州市( $1.81 \times 10^7$  t/a) > 宁德市( $1.70 \times 10^7$  t/a) > 龙岩市( $1.33 \times 10^7$  t/a) > 三明市( $1.16 \times 10^7$  t/a) > 南平市( $8.84 \times 10^6$  t/a) > 莆田市( $6.91 \times 10^6$  t/a) > 厦门市( $2.60 \times 10^6$  t/a);从空间分布上看,全省整体呈现块状不连续分布,土壤侵蚀模数由东南沿海向西北内地减小趋势,但局部丘陵山区

土壤侵蚀较为严重,主要分布在闽西大山带和闽中大山带两侧,如福州西部、莆田南部、泉州西部、漳州南部、龙岩中部和西北部、三明南部、南平西北部和宁德西北部等地区(见图 3a)。

表 1 福建省土壤侵蚀量和土壤保持量

行政区	土壤侵蚀总量/(10 <sup>4</sup> t·a <sup>-1</sup> )		单位面积土壤侵蚀量/(t·km <sup>-2</sup> ·a <sup>-1</sup> )		土壤保持量	
	潜在侵蚀	实际侵蚀	潜在侵蚀	实际侵蚀	侵蚀总量/(10 <sup>4</sup> t·a <sup>-1</sup> )	单位面积侵蚀量/(t·km <sup>-2</sup> ·a <sup>-1</sup> )
福州市	27 938.07	2 728.02	25 998.57	2 576.27	25 210.05	23 422.30
莆田市	7 654.95	691.06	21 340.80	1 957.11	6 963.89	19 383.69
泉州市	22 339.68	2 759.08	20 862.61	2 602.91	19 580.60	18 259.70
厦门市	1 950.29	259.84	15 515.46	2 142.13	1 690.45	13 373.33
漳州市	23 979.55	1 806.54	19 923.19	1 519.38	22 173.01	18 403.81
龙岩市	38 835.60	1 330.03	20 477.51	705.02	37 505.58	19 772.49
三明市	53 240.14	1 160.79	23 317.19	508.14	52 079.36	22 809.06
南平市	69 100.35	884.45	26 465.09	337.60	68 215.90	26 127.49
宁德市	33 221.69	1 701.54	26 950.34	1 393.79	31 520.15	25 556.55
合计	278 260.31	13 321.34			264 938.97	
平均			22 316.75	1 526.93		20 789.82

2.2 潜在土壤侵蚀量

全省潜在土壤侵蚀总量为 2.78×10<sup>9</sup> t/a,平均潜在土壤侵蚀模数为 22 316.75 t/(km<sup>2</sup>·a)(见表 1)。从潜在土壤侵蚀量上看,南平市(6.91×10<sup>8</sup> t/a)>三明市(5.32×10<sup>8</sup> t/a)>龙岩市(3.88×10<sup>8</sup> t/a)>宁德市(3.32×10<sup>8</sup> t/a)>福州市(2.79×10<sup>8</sup> t/a)>漳州市(2.40×10<sup>8</sup> t/a)>泉州市(2.23×10<sup>8</sup> t/a)>莆田市(7.65×10<sup>7</sup> t/a)>厦门市(1.95×10<sup>7</sup> t/a);从空间分布上看,与实际土壤侵蚀模数相反,潜在土壤侵蚀模数整体呈现由东南沿海向西北内地增大趋势,这主要与福建省地形和降雨等侵蚀因子密切相关(见图 3b)。

2.3 土壤保持量

全省土壤保持总量为 2.65×10<sup>9</sup> t/a,平均土壤保持模数为 20 789.82 t/(km<sup>2</sup>·a)(见表 1)。从土壤保持量上看,南平市(6.82×10<sup>8</sup> t/a)>三明市(5.21×10<sup>8</sup> t/a)>龙岩市(3.75×10<sup>8</sup> t/a)>宁德市(3.15×10<sup>8</sup> t/a)>福州市(2.52×10<sup>8</sup> t/a)>漳州市(2.22×10<sup>8</sup> t/a)>泉州市(1.96×10<sup>8</sup> t/a)>莆田市(6.96×10<sup>7</sup> t/a)>厦门市(1.69×10<sup>7</sup> t/a);从空间分布上看,土壤保持模数整体呈现由东南沿海向西北内地增大趋势,这主要与地表植被覆盖密切相关(见图 3c)。

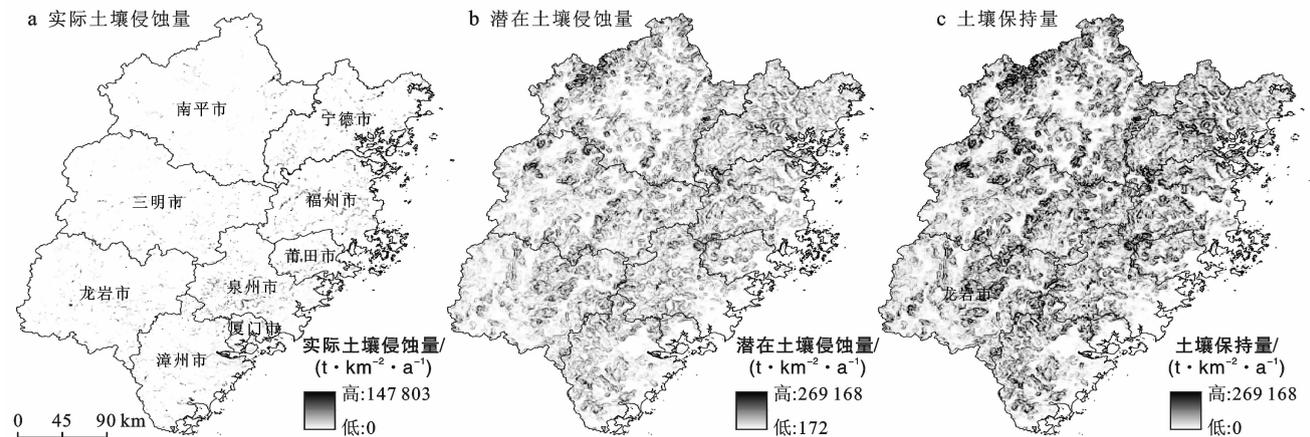


图 3 福建省土壤侵蚀及土壤保持强度空间分布

2.4 水土保持功能重要性

福建省土壤保持模数为 0~269 168 t/(km<sup>2</sup>·a)(见图 3c),根据自然断点法<sup>[9-10]</sup>以 17 945,40 111,67 556,109 778 t/(km<sup>2</sup>·a)为分界值,将全省水土保持功能重要性评价等级分为 5 级,统计得到表 2。全

省水土保持功能极其重要区、高度重要区、中等重要区、较为重要区和一般重要区面积分别为 3 192.54,8 205.54,15 547.71,21 519.81,74 000.20 km<sup>2</sup>,分别占全省面积的 2.61%,6.70%,12.70%,17.57%和 60.42%。

从空间分布上看,极其重要区零星分布在闽西大山带和闽中大山带,如南平西北部、三明西北部、宁德西北部等;高度重要区块状零散分布在闽西大山带和闽中大山带的山地、丘陵地区,如龙岩中部、三明东南部、福州西北部等;中等重要区集中分布在闽西大山

带、闽中大山带东麓和西麓的低山丘陵地区,如龙岩中部、三明东南部、漳州西北部、泉州西部、福州西北部等;较为重要区广泛分布在局部山区的盆地、河谷及部分沿海平原地区;一般重要区大面积分布在山区盆地和沿海平原地区(见封 3,附图 16)。

表 2 水土保持功能重要性划分结果

行政区	土地面积/km <sup>2</sup>	一般重要		较为重要		中等重要		高度重要		极其重要	
		面积/km <sup>2</sup>	占比/%	面积/km <sup>2</sup>	占比/%	面积/km <sup>2</sup>	占比/%	面积/km <sup>2</sup>	占比/%	面积/km <sup>2</sup>	占比/%
福州市	11 729.60	6 532.31	55.69	1 975.66	16.84	1 804.57	15.38	1 014.59	8.65	402.47	3.43
莆田市	3 918.78	2 323.97	59.30	707.41	18.05	521.51	13.31	251.40	6.42	114.49	2.92
泉州市	11 135.02	7 101.71	63.78	1 876.76	16.85	1 069.75	9.61	838.09	7.53	248.71	2.23
厦门市	1 617.16	1 145.40	70.83	320.92	19.84	72.49	4.48	75.37	4.66	2.98	0.18
漳州市	12 729.74	7 844.93	61.63	2 246.22	17.65	1 283.94	10.09	1 003.59	7.88	351.05	2.76
龙岩市	19 031.86	12 364.81	64.97	3 547.08	18.64	1 925.74	10.12	973.90	5.12	220.34	1.16
三明市	22 998.91	14 426.25	62.73	3 947.29	17.16	2 862.28	12.45	1 228.28	5.34	534.82	2.33
南平市	26 299.42	15 511.45	58.98	4 246.56	16.15	3 965.46	15.08	1 766.46	6.72	809.48	3.08
宁德市	13 005.31	6 749.37	51.90	2 651.92	20.39	2 041.95	15.70	1 053.87	8.10	508.20	3.91
合计	122 465.80	74 000.20	60.42	21 519.81	17.57	15 547.71	12.70	8 205.54	6.70	3 192.54	2.61

### 3 结论与讨论

#### 3.1 结论

本文基于 GIS 技术,利用降水、土壤、数字高程和植被指数等数据,采用修正通用水土流失方程(RUSLE),估算福建省土壤保持量,并对其分级。结果表明:全省土壤保持总量为  $2.65 \times 10^9$  t/a,平均土壤保持模数为 20 789.82 t/(km<sup>2</sup>·a)。水土保持功能极其重要区、高度重要区、中等重要区、较为重要区和一般重要区面积分别为 3 192.54,8 205.54,15 547.71,21 519.81,74 000.20 km<sup>2</sup>,分别占全省面积的 2.61%,6.70%,12.70%,17.57%和 60.42%。评价结果揭示了福建省水土保持功能极其重要区、高度重要区和中等重要区主要分布在闽西和闽中 2 大山带及其周边丘陵山地区。

#### 3.2 讨论

本研究结果在空间分布上与《福建省生态功能区划》中水土保持功能区范围基本一致。说明本研究结果基本合理,可为福建省生态保护红线划定提供参考。

福建省闽西和闽中 2 大山带及其周边丘陵山地区,森林覆盖率高,植被对降雨拦截,消减降雨势能,缓冲降雨对土壤的打击,且地表枯枝落叶层有效减少土壤侵蚀,具有较高的土壤保持能力。近年来,政府相继编制完成一批重点治理工程规划,尤其是 22 个重点县水土流失综合治理和各种专项治理规划等,实施了一系列退耕还林还草、封山育林育草和茶果园

坡改梯等生态保护工程,提高了该区域的植被覆盖率<sup>[4-5]</sup>。

研究区水土保持功能极其重要区、高度重要区和中等重要区主要分布在闽西和闽中 2 大山带及其周边丘陵山地区。一方面,该区域降雨丰富,且时间集中、强度大,极易产生水土流失,尤其是在丘陵山地区的裸地和坡耕地,是水土流失的主要分布区<sup>[3,13]</sup>;另一方面,该区域海拔高、坡度陡,由于人类活动,如山地茶果园开垦、矿产资源开发、城镇开发区建设、交通设施建设等,造成周边地表植被破坏,导致严重水土流失<sup>[5,7]</sup>。可见,闽西和闽中 2 大山带及其周边丘陵山地区下垫面的植被对减少水土流失起到了重要作用。该区域应加强植被保护,减少陡坡开垦,实施退耕还林还草、严格管控生产建设等措施,除以预防为主外,还应加强动态防护监管,完善水土保持监测体系,建立水土保持信息化系统。

本研究还存在不足:受基础数据收集限制,降雨侵蚀力估算仅采用国家级台站数据,如能采用更多地方级台站数据,可进一步提高估算精度;运用 RUSLE 开展水土保持功能重要性评价,各因子的计算方法很关键,本研究坡度因子采用刘宝元的计算方法,该方法来自于黄土高原坡面实测数据,能否适用于南方丘陵区,精度有待检验;以土壤保持量作为生态系统水土保持功能重要性划分的级数及其指标,目前尚无明确标准,本研究结合福建省水土流失现状和生态保护需求情况,采用自然断点法将重要性评价等级分为 5 级,后期将根据实际调查情况进行完善。

## [ 参 考 文 献 ]

- [1] 余新晓,吴岚,饶良懿,等.水土保持生态服务功能评价方法[J].中国水土保持科学,2007,5(2):110-113.
- [2] 冯磊,王治国,孙保平,等.黄土高原水土保持功能的重要性评价与分区[J].中国水土保持科学,2012,10(4):16-21.
- [3] 王振平,汪小钦,曾舒娇,等.福建省水土流失现状分析[J].水土保持通报,2017,37(5):169-175.
- [4] 阮伏水,韩永刚.新中国成立以来福建省水土保持工作情况[J].中国水土保持,2019(10):8-12.
- [5] 曾舒娇,汪小钦,陈贤干,等.福建省水土流失的时空变化[J].水土保持通报,2017,37(6):305-312.
- [6] 王春菊,汤小华,郑达贤,等. GIS支持下的土壤侵蚀敏感性评价研究[J].水土保持通报,2005,25(1):68-70.
- [7] 陈思旭,杨小唤,肖林林,等.基于RUSLE模型的南方丘陵山区土壤侵蚀研究[J].资源科学,2014,36(6):1288-1297.
- [8] 生态环境部,国家发展改革委.生态保护红线划定指南[Z].北京:生态环境部,2017.
- [9] 李该霞,宋蒙亚,谢丽芳,等.江苏省水土保持功能的重要性评价[J].水土保持通报,2016,36(1):236-241.
- [10] 柏松,景连东,冯文兰,等.四川省水土保持生态保护红线划定方法研究[J].生态环境学报,2018,27(4):699-705.
- [11] 刘海,黄跃飞,林苗,等.基于GIS的汉江流域水土保持时空变化特征分析(2001—2017年)[J].地域研究与开发,2019,38(3):154-159.
- [12] 蔡崇法,丁树文,史志华.应用USLE模型与地理信息系统IDRISI预测小流域土壤侵蚀量的研究[J].水土保持学报,2000,14(2):19-24.
- [13] 周伏建,陈明华,林福兴,等.福建省降雨侵蚀力指标R值[J].水土保持学报,1995,9(1):13-18.
- [14] 刘宝元,毕小刚,符素华,等.北京土壤流失方程[M].北京:科学出版社,2010:7-13.
- [15] 陆建忠,陈晓玲,李辉,等.基于GIS/RS和USLE鄱阳湖流域土壤侵蚀变化[J].农业工程学报,2011,27(2):337-344.

(上接第249页)

- [16] 赵水霞,李畅游,李超,等.基于3S技术的黄河内蒙古段河道演变特性分析[J].水利水电科技进展,2016,36(4):70-74.
- [17] Yao Zhengyi, Ta Wanquan, Jia Xiaopeng, et al. Bank erosion and accretion along the Ningxia-Inner Mongolia reaches of the Yellow River from 1958 to 2008 [J]. Geomorphology, 2010,127(1) 99-106.
- [18] 李健锋,叶虎平,张宗科,等.基于Landsat影像的斯里兰卡内陆湖库水体时空变化分析[J].地球信息科学学报,2019,21(5):781-788.
- [19] 徐涵秋.利用改进的归一化差异水体指数(MNDWI)提取水体信息的研究[J].遥感学报,2005,9(5):589-595.
- [20] 杨修国.图像阈值分割方法研究与分析[D].上海:华东师范大学,2009.
- [21] Tieg S D, Pohl M. Planform channel dynamics of the lower Colorado River: 1976—2000 [J]. Geomorphology, 2005,69(1/2/3/4):14-27.
- [22] 李子文,秦毅,陈星星,等.2012年洪水对黄河内蒙古段冲淤影响[J].水科学进展,2016,27(5):687-695.
- [23] 冉立山,王随继.黄河内蒙古河段河道演变及水力几何形态研究[J].泥沙研究,2010(4):61-67.
- [24] 吴中海,吴珍汉.大青山晚白垩世以来的隆升历史[J].地球学报,2003,24(3):205-210.
- [25] 刘建辉,张培震,郑德文,等.贺兰山晚新生代隆升的剥露特征及其隆升模式[J].中国科学:地球科学,2010,40(1):50-60.
- [26] 李炳元,葛全胜,郑景云.近2000年来内蒙后套平原黄河河道演变[J].地理学报,2003,58(2):239-246.
- [27] 汪一鸣.历史时期黄河银川平原段河道变迁初探[J].宁夏大学学报(自然科学版),1984(2):52-60.
- [28] 王富强,韩宇平.黄河宁蒙河段冰凌成因及预报方法研究[M].北京:中国水利水电出版社,2014.

(上接第261页)

- [10] 范建忠,李登科,周辉.陕西省退耕还林工程区植被覆盖度的变化分析[J].干旱地区农业研究,2013,31(4):207-213,223.
- [11] 李旺君,吕昌河.生态建设对陕北植被变化的影响分析[J].干旱区地理,2014,37(2):318-324.
- [12] 曹艳萍,庞营军,贾晓红.2001—2016年毛乌素沙地植被的生长状况[J].水土保持通报,2019,39(2):29-37.
- [13] 闫峰,吴波,王艳姣.2000—2011年毛乌素沙地植被生长状况时空变化特征[J].地理科学,2013,33(5):602-608.
- [14] 刘登峰,王心睿,黄强,等.毛乌素沙漠南部植被指数的变化规律研究[J].水资源与水工程学报,2017,28(3):5-9.
- [15] 张翀,任志远.黄土高原地区植被覆盖变化的时空差异及未来趋势[J].资源科学,2011,33(11):2143-2149.
- [16] 刘旻霞,赵瑞东,邵鹏,等.近15a黄土高原植被覆盖时空变化及驱动力分析[J].干旱区地理,2018,41(1):99-108.
- [17] 陈振宏.浅谈榆林地区退耕还林的现状成效问题及对策[J].农业与技术,2015,35(13):82-83.